基于六关节串联机器人的飞行仿真系统

1. 飞行仿真系统基本结构

飞机在空中飞行时，具有6个自由度，即质心位置(坐标)和姿态(偏航角、俯仰角和滚转角)。尽管6关节串联机器人同样具有6个自由度，但是其运动范围和姿态范围均有限，仅能够在一定范围内模拟飞机运动。为了提高运动范围，本系统将机器人安装在直线导轨上(即机器人第七轴)，由第七轴实现方向上的运动，机器人本体则用于方向的位置变化，和姿态角变化。

图1显示了本系统的控制框图。该系统中，通过摇杆、油门杆等实现飞机操控。控制信号输入仿真计算机后，由飞控律解算出位置和姿态变化速率(加速度和角加速度)。X轴的加速度通过以太网传输至用于控制第七轴的PLC，由其经积分并限幅后得到X轴运动量，输出控制信号值伺服控制器，驱动第七轴运动。其他各轴的加速度和角速度在上位机中积分并限幅，得到位置和姿态后，通过以太网输出至机器人控制器，控制机器人运动。



图1. 系统控制结构框图

2. 机器人运动空间搜索与优化

受到机械运动范围、机械干涉等因素制约，串联机器人运动空间有限，且在某些位姿条件下，存在奇异点问题。多数典型工作环境下，机器人沿固定工作路线和轨迹运动。这些轨迹通常以示教等方式离线规划好，确保机器人可以到达轨迹中的每个位姿，不会出现机械干涉等问题。当机器人用于飞行模拟仿真时，由于飞机的运行轨迹不可能事先确定和规划，因此需要确保在一定位置和姿态范围内，机器人不会出现运动受限的问题。为此，需要对机器人的运动空间加以搜索和优化，找出适合于飞行模拟所使用的运动空间范围。

2.1 6关节串联机器人奇异点

本系统选择使用ABB IRB4600-60/2.05型机器人，其结构构型如图2所示。机器人共有6个旋转关节，图中标记为A~F，文中称为第1~第6关节。每个关节驱动一个臂，文中称为第1~6轴。机器人第6轴末端为法兰盘，用于安装固定飞机模型。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

图2 6关节机器人结构组成

串联机器人在运动空间中存在奇异点，到达这些奇异点时，逆向运动学计算会出现无穷多解、驱动器速度无穷大等问题，从而导致机器人停机告警。这些奇异点包括：腕关节奇异点、顶部奇异点和延伸奇异点，如图3所示。

1) 腕关节奇异点

当机器人第4轴与第6轴平行时(如图3a所示)，机器人处于腕部奇异点。此时由于第4轴和第6轴平行，当要求机器人末端围绕6轴转动时，4、6轴将出现无穷多逆解组合，从而导致运动控制失败。

2) 顶部奇异点

当腕关节中心（关节4、5、6的旋转轴汇交的点）的位置位于第1关节轴线的上方时，该位置称为机器人的顶部奇异点。处于该位置时，首先第一关节的会有无穷多解；其次容易造成关节1和关节4瞬间旋转180°；最后还有更为特殊情况：在该位置时，同时6关节的轴线与1关节轴线重合。如图3b所示。

3) 延伸奇异点

当J2-J3延长线经过腕关节中心点时机器人处于延伸奇异点。机器人端点的速度不是任意的了，而是只能产生某个方向上的速度。这种奇异点属于边界奇异点。如图3c所示。

以上三个奇异点中，影响飞机飞行模拟的主要是腕关节奇异点，因此需要在运动空间搜索时予以考虑。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| a. 腕关节奇异点 | b. 顶部奇异点 | c. 延伸奇异点 |

图3. 机器人奇异点

2.3 搜索机器人运动空间

串联机器人是非线性系统，其运动范围是一个非凸空间，无法解析求解，只能通过数值方法进行检测探查。机器人具有6个自由度，形成6维空间，无法直接加以可视化显示。为了便于显示和观察机器人运动空间，将姿态角范围看做约束条件，从而将运动空间的维度降低为三维。具体定义为：

定义机器人运动空间为位置坐标集合，使机器人在每个位置坐标点上，姿态角可以在在*，*和范围内连续变化，不会受到机械结构制约，也不会遇到奇异点问题。

机器人运动在连续空间中，不便于搜索，因此按照一定步长对空间离散化，之后枚举检测每个位置坐标是否满足要求。姿态角同样是连续变量，即使将其离散化，仍然存在大量角度需要检测。例如，假设均属于±15°之间，以1°为步长将其离散化，则存在个姿态角度组合需要检测，造成极大的计算压力。为降低计算量，仅对姿态角的最大、最小值组合进行检测，即检测机器人能否到达，，…，这8种姿态角组合，从而极大降低检测数量。由于机器人的运动空间非线性，这样检测有可能造成一定错误，但影响较低，可以加以忽略。

从前述分析看，机器人运动空间主要受到腕关节奇异点影响，该奇异点是由于机器人第4、6轴在运动中平行造成的。此时，关节5的夹角为180°。关节5主要产生飞机俯仰运动，因此在每个位置，检测机体俯仰角为0°时，关节5的夹角，并判断是否存在。如果存在，则说明机器人在俯仰运动中，有可能导致关节5夹角为180°，进而产生腕关节奇异点问题。该检测方法同样不够精确，但影响较低可以加以忽略。

在试验中，飞机模型有可能与机器人第4轴发生机械干涉，同样需要加以检测。

基于以上说明，在ABB机器人仿真环境中，编写测试程序枚举检测机器人运动空间，流程如下。在ABB仿真软件Robot Studio中导入机器人本体与对应的工具模型后，以为步长将机器人位置坐标X,Y,Z离散化，以为步长将机器人姿态坐标离散化，对空间逐一位置，逐一姿态进行搜索。在搜索过程中判断目标点可达性时利用ABB机器人RAPID编程语言中的CalcJoint函数，该函数可以将输入点的位置姿态信息（）转换为该点的六轴角度信息（），通过比对该点的六轴角度信息与机器人六轴角度的运动范围返回一个布尔值去描述该点的可达性。由于CalcJoint函数只能判断移动到目标点是否六轴超限，并不能考虑到奇异点和机械干涉的问题，所以在使用CalcJoint函数的前提下需要再手动追加三个轴限制条件来达到目的：

(1) 规避腕关节奇异点：在做目标点的可达性检测时约束机器人5轴夹角满足或。因为ABB机器人系统在做奇异点判断时将以内均划为判定范围，机器人在EGM(Externally Guided Motion)模式下运动时进入判定范围则报警停机。考虑到机器人运动时存在惯性，故取作为约束条件以保证机器人尽可能安全的避开腕关节奇异点。

(2) 规避机械干涉：通过计算当机器人5轴夹角时，飞机模型的尾部会和机器人第四关节臂发生机械碰撞。同样考虑机器人运动时的惯性，取的阈值，约束以规避飞机和机械臂之间的机械干涉。

(3) 由于本课题只使用机器人部分的运动空间，故设置机器人1轴满足。

通过设置以上约束条件可达到搜索特定条件下机器人运动空间的目的。

图4以基于Z轴的等高线方式，显示了一个机器人运动空间，其中姿态角范围均为，搜索步长。由于本课题仅使用到机器人部分的运动空间，因此搜索范围仅限于。图4a显示了运动空间的整体外观，图4b~4c显示了不同Z轴高度范围中机器人运动空间的截面。可以看出，受到奇异点和机械约束等影响，满足要求的运动空间大体上是月牙形，且随着Z轴向两端增大或缩小，空间持续减小。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
| a | b | c | d |

图4. 机器人运动空间

2.4 优化机器人工作空间

用于飞行模拟试验的机器人运动空间，称为工作空间。显然，。为了便于设计控制算法，应当是一个满足的三维矩形空间，从而使三个维度上的运动解耦。定义为，其中是工作空间中心位置坐标，是空间长宽高缩放比例，是矩形尺寸，即矩形的长宽高分别为。

为了充分利用机器人运动空间，需要在给定条件下找出具有最大的，从而使飞机模型的运动范围最大化。该问题称为机器人工作空间的优化问题，定义为

由于优化工作空间时，均为固定参数，因此以下简化为。

将该优化问题分解为几个子问题加以解决。首先，对于给定，判断是否。由于机器人运动空间是一个无法解析表达的非凸空间，因此只能采取数值方法进行判定。搜索机器人运动空间时，位置坐标进行了离散化处理，因此是一个包含有限个坐标点的集合。因此，最为简单的检测方法，是对空间以相同步长离散化，之后枚举检测是否每个，均满足。但是，该方法效率较低，优化搜索速度较慢。为提高效率，本文采取以下判断方法：

1) 检测是否中心坐标，如果不属于，则；

2) 检测空间的边界点是否属于空间，如果属于，则；

3) 如果以上两种情况都未出现，则。

在此基础上，在给定工作空间中心坐标时，采用二分搜索法最大化工作空间的。

|  |
| --- |
| 算法1. 给定时最大化工作空间 |
| 步骤1. 令。  步骤2. 如果，则令，，重复步骤2。如果，则令，进入步骤3。  步骤3. 如果，则令，退出搜索；否则进入步骤4。  步骤4. 令。如果，则令，否则令。如果，则重复步骤4；否则令，退出搜索。 |

之后优化，找出最大工作空间的中心坐标。由于机器人运动空间以X轴为对称轴，因此最优工作空间必然满足，从而只需要对进行优化。可以通过枚举方法搜索优化，但是计算效率极低，需要设计更为高效的优化搜素算法。由于空间已被离散化，难以获得梯度信息，因此论文基于无需梯度信息的多维单纯型下降法(Nelder-Mead Method)构造工作空间优化算法。单纯型法的基本思想是在N维空间中，构造一个非退化的初始单纯型，然后通过一系列的几何操作，如反射、扩展、收缩等，逐步往极值点移动该单纯形，从而最终找到极值点。假设已知初始解，构造初始单纯型。初始单纯型由三个端点构成，分别为，和。可以看出，该单纯型为XZ平面上的一个三角形。由初始单纯型开始，基于算法2搜索最优工作空间中心坐标。

|  |  |
| --- | --- |
| 算法2. 优化工作空间中心位置 | |
| 步骤1 | 基于算法1，计算对应的值，记做。对解重新排序，使得。 |
| 步骤2 | 计算除过最差解以外其解的中心点：  计算相对于的对称点  其中为实数。 |
| 步骤3 | 令，计算对称点以及。考虑以下情况：   1. 如果，则令，计算对称点。如果，则令(如图5.a所示)；否则令。进入步骤5。 2. 如果，则令，如图5.b所示。进入步骤5。 3. 如果，则令，计算对称点。如果，则令(如图5.c所示)，进入步骤5；否则进入步骤4。 4. 如果，则令，计算对称点。如果，则令(如图5.d所示)，进入步骤5；否则进入步骤4。 |
| 步骤4 | 令朝向收缩，即：  如图5.e所示。进入步骤5。 |
| 步骤5 | 如果，其中为计算精度阈值，则停止迭代计算，将作为最优工作空间中心点；否则，重复步骤1。 |



图5. 单纯型法寻优

当解空间为凸空间时，从任意一个初始解出发，一定能够找到全局最优解。但是当解空间非凸时，不合适的初始解有可能导致搜索算法陷入局部小，从而无法到全局最优解。图6a显示了机器人运动空间的侧视图(即XZ平面视图)。可以看出，运动空间是一个非凸空间，但如果沿Z轴从上向下将其分割为若干个子空间，则每个子空间可以近似为一个凸空间。因此，本文沿Z轴产生一系列初始解，分别由其出发基于算法2搜索优解，最后从中选择具有最大L的解 。具体算法如下：

|  |
| --- |
| 算法3. 搜索最优工作空间 |
| 步骤1. 令和分别为机器人运动空间的最低和最高Z轴坐标。令。  步骤2. 令，其中是初始解数量。在高度，搜索属于的最…..，令。以为初始解，基于算法2搜索工作空间，记做。  步骤3. 令。如果，则重复步骤2，否则令，其中。返回作为最优工作空间。 |

论文中设置。试验测试表明，该方法可以准确获得最优工作空间，且计算时间显著少于枚举法。本课题中，由于飞机在X轴上的运动由第七轴实现，且在Y轴和Z轴的运动范围一致，因此令。图6b显示了基于以上方法确定的机器人最优工作空间。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| a | b |

图6 机器人运动空间(侧视图)和最优工作空间

2.2 飞机模型的安装方式

飞机模型以不同方式安装在机器人上，其运动空间范围有很大不同。图7显示了几种不同的安装方式。图7a和图7b中，机器人采用末端托举的方式固定飞机模型，机器人的部分自由度消失。图7a中，飞机的航向运动将和俯仰运动耦合，当飞机俯仰角变化时，其质心坐标也随之变化。图7b中，虽然飞机的俯仰运动与航向解耦，但是缺失了滚转运动。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| a | b |
|  |  |
| c | d |

图7 飞机模型安装方式

图7c所示安装方式中，在机器人正常运动范围内，飞机的各个自由度之间不存在耦合关系，但存在奇异点问题，如图8所示。假设飞机俯仰角为。当飞机俯仰运动时(图8a)，或者Z轴高度改变时(图8b)，第4、6轴容易位于同一轴线，从而导致腕关节奇异点问题。



图8 机体运动时遭遇奇异点

通过令末端法兰盘和飞机之间增加一定的安装角，能够规避腕关节奇异点问题，如图9所示。图9a显示了以图6c方式安装飞机模型时，存在一个奇异区间，该区间将Z轴空间范围分割为上下两个非奇异空间，飞行模拟只能利用其中的一个空间。图9b显示了以图6d方式安装飞机模型，此时奇异区间处于Z轴空间范围的上部，飞机可以在一个较大的连续空间中运动而不会出现腕部奇异。因此，课题基于图6d所示安装方式，在机器人上固定安装飞机模型。具体安装角的选择，则需要通过数值计算进一步确定。



图9 通过安装角避免腕部奇异点对运动空间的分割

为了确定合适的安装角，设定飞机姿态角范围为，测试当，且时机器人的工作空间(这部分需要重新计算一次，之前的数据文件格式和新的程序不兼容。步长取到40好了。)。表1显示了测试结果：

表1. 安装角对应工作空间大小(需要重新计算)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 安装角 | 运动范围(mm) | 工作空间中心坐标 |
|  | ±1200 | (1400, 0, -40) |
|  | ±1160 | (1840, 0, 280) |
|  | ±1120 | (2080 0, 600) |
|  | ±880 | (2320, 0, 680) |

（对比图是否需要改成15、30、45）图10显示了不同安装角时机器人运动空间和工作空间的分布。可以看出，当安装角较小时，腕关节奇异点对于工作空间产生了较大限制，而当安装角较大时，Z轴较低位置的运动空间显著缩小，同样限制了工作空间大小。当安装角在30°附近时，机器人具有相对较大的工作空间。尽管很可能不是最优安装角，但是该角度便于机械加工和安装调整，因此本课题选择该角度作为飞机模型和连接杆之间的夹角。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |

图10. 安装角对于工作空间的影响

2.3 姿态角范围对于工作空间的影响

姿态角范围对于机器人工作空间具有显著影响，在相同条件下，姿态角范围越大，则工作空间越小。表2显示了装角，姿态角范围不同时，工作空间的大小和中心位置。

表2. 姿态角和工作空间

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  | 空间范围(mm) | 空间中心坐标(mm) |
| 15° | 15° | 15° | ±1140 | (2080, 0, 600) |
| 15° | 20° | 20° | ±980 | (2180, 0, 500) |
| 15° | 25° | 25° | ±880 | (2240, 0, 460) |
| 15° | 30° | 30° | ±740 | (2320, 0, 420) |

可以看出，随着姿态角变大，工作空间的范围在减小，中心位置发生变化。如果固定使用较大的姿态角范围，飞机的运动范围较小；如果固定使用较小的姿态角范围，则对于飞机姿态变化的模拟不够准确。为了扬长避短，选择设定多个运动范围，如图11所示。当飞机位于最里层范围内时，姿态角范围较大；随着飞机偏离工作空间中心越大，则姿态角范围随之减小。



图11. 具有共同中心的多层嵌套工作空间

在该模式下，每一层工作空间的中心坐标均相同，因此需要重新计算其运动范围。表3显示了工作空间中心均为时的运动范围

表3. 工作空间中心为时的运动范围

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  | 运动范围(mm) |
| 15° | 15° | 15° | ±1140 |
| 15° | 20° | 20° | ±540 |
| 15° | 25° | 25° | ±320 |
| 15° | 30° | 30° | ±120 |

可以看出，姿态角范围大于时，其运动范围远小于表2中的运动范围，不利于飞行模拟试验。因此，将工作空间中心调整为，重新计算工作空间运动范围，如表4所示。可以看到，姿态角范围时的工作空间范围有所缩小，但其他姿态角范围所对应的工作空间范围相应增加。因此，最终选择使用作为工作空间的中心坐标。

表4. 工作空间中心为时的运动范围

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  | 运动范围(mm) |
| 15° | 15° | 15° | ±1000 |
| 15° | 20° | 20° | ±980 |
| 15° | 25° | 25° | ±420 |
| 15° | 30° | 30° | ±180 |

4. 机器人运动控制算法

将机器人用于飞行模拟时，计算机基于操作输入(摇杆、脚蹬、节流阀等)和飞机飞行动力学模型实时计算出飞机位置与姿态，机器人带动飞机模型跟随位置与姿态变化，实现飞行模拟。这一控制模式与典型机器人应用有很大不同，因此需要设计合适的运动控制算法，实现机器人连续随动，并避免机器人运动超限。

4.1 机器人连续随动控制

绝大多数工业应用场景中，机器人按照固定轨迹进行重复性工作，控制器可以预先对运动轨迹进行插值，得到一条光滑运动路线。用于飞行模拟时，计算机以较高频率(通常不低于100Hz)通过飞行动力学模型实时计算飞机位姿，通过以太网传送至机器人控制器。由于运动轨迹不确定，更新速率较高，通用的工业机器人控制模式通常无法满足实时随动跟踪位姿变化的需求。考虑到以上因素，本课题选用了ABB工业机器人。ABB工业机器人优势在于其可以向用户提供一项高级应用选项—EGM(Externally Guided Motion)，本课题的机器人连续随动控制正是基于EGM选项下的Position Guidance 功能。EGM Position Guidance通过绕过相关路径规划的方式为机器人控制器提供了一个低级接口，用户可通过EGM Position Guidance来读取机器人的实时位置信息或者向机器人控制器写入一个新的目标点位置。在该模式下，机器人控制器仅可通过UDP与上位机通信，其通信速度可达4ms/次。通信中使用Google Protocol Buffers协议对通信内容进行序列化，提高传输效率，实现机器人控制器与上位机之间的高速信息交换。在使用EGM Position Guidance对机器人进行控制时，与其他外部运动控制手段相比，EGM Position Guidance最大的优点在于其高速率和低延迟。从机器人控制器收到上位机发来的目标点位置信息到机器人开始向目标点运动一般情况下只伴随着10~20ms的控制延迟(具体延迟取决于相关机器人的类型)。此外由于EGM模式绕过了路径规划，因此用户输入的位置信息会直接创建相应的机器人路径，所以在控制时只需确保发送给机器人控制器的位置信息尽量平顺，机器人运动的流畅性就可以得到保证。在安全方面，EGM模式下机器人控制器依旧会对机器人的运动状态和位置进行监控，必要时进行报警甚至紧急停止。

4.2 运动控制算法

飞机飞行时，其6自由度不受外部因素限制，而使用机器人模拟时，其运动范围受到机器人工作空间的限制。在工作空间之内，控制算法令机器人跟随飞行动力学模型所产生的位姿变化；当机器人接近工作空间限制范围时，控制算法需要避免运动给定超出限制，且避免由于运动受限造成过大的加速度冲击。

基于6自由度并联机器人的飞行模拟器在飞行员培训、新机型研发等领域具有广泛应用。这类模拟器主要用于通过平台的运动和姿态变化，模拟飞机的加速度和角速度变化，从而增强飞行员的飞行体感。本课题则主要用于模拟飞机的外部位置和姿态变化，因此其控制算法与常见飞行模拟器有所不同。